

衛星搭載フェーズドアレーアンテナを用いた電波干渉対策に関する研究

著者	松本 泰
号	1834
発行年	1998
URL	http://hdl.handle.net/10097/10641

氏 名	まつ もと やすし 松 本 泰
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成10年 7月 8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	昭和60年 3月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	衛星搭載フェーズドアレーアンテナを用いた電波干渉対策に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学教授 米山 務 東北大学教授 水野 皓司

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

衛星通信の普及に伴い、衛星回線における電波干渉の顕在化が懸念されている。衛星通信システムの干渉は、一般的には国際的取り決めに従って局位置や周波数などの調整を行うが、衛星軌道や周波数帯域は有限であり、今後一層の干渉対策技術の開発が必要である。

無線通信回線の干渉対策は原理上、時間・周波数領域の技術と、空間領域の技術に大別される。空間領域の干渉対策は、干渉波と所望波の到来方向の違いを利用して干渉を軽減する技術であり、近年精力的に研究が進められたアダプティブアンテナに代表される。この技術を衛星回線に適用する場合、衛星から地球局へのダウンリンク干渉については、干渉状況が容易に評価でき、また干渉が発生した時点での対策が可能ため一部では既に実用化された例もある。これに比較してアップリンク干渉は衛星打上げ前に衛星軌道上での干渉の予測が困難であり、また衛星搭載機器への重量、構造等の制限と、打上げ上後の機器の追加・改修が困難であるといった制約が大きいため、十分な対策が進んでいない。

一方、通信衛星搭載アンテナの技術的傾向として柔軟なビーム形成機能を持つアクティブフェーズドアレーアンテナが注目されている。フェーズドアレーアンテナは通信衛星搭載用としてはコスト、重量、消費電力の制約から、従来は特殊な用途に限られていたが、近年のマイクロ波技術などの進展によりこれらの問題が解決されつつあり、また衛星通信システム全体から見たフェーズドアレーアンテナの優位性が認識されている。フェーズドアレーアンテナの持つビーム形成能力は電波干渉問題にも原理的に有効と考えられる。しかしフェーズドアレーアンテナを搭載した従来の衛星においてもヌル形成や干渉抑圧など実際の有効性を示した報告は行われていない。

本論文ではこのような背景から、アップリンク干渉対策における衛星搭載フェーズドアレーアンテナによる対策技術の有効性を明らかにする。

第2章 衛星搭載フェーズドアレーアンテナによる実験システム

本章では、衛星搭載フェーズドアレーアンテナと地球局により構成された実験システムについて述べている。実験に使用したSバンドフェーズドアレーアンテナは、周回衛星との衛星間通信用に開発された搭載機器である。マイクロストリップ放射素子やマイクロ波IC技術により重量や寸法などの技術課題を解決し、衛星上でビーム形成する方式としては世界初の衛星搭載マルチビーム・アクティ

ブアレーアンテナを実現している。

本アンテナを搭載した技術試験衛星V I型（E T S - V I）は、我が国初の2トン級大型静止衛星であり、アポジエンジンの不具合により本来の静止軌道ではなく楕円軌道上で運用されるに至ったが、姿勢制御機能の改修などにより、短時間ながら通信実験が可能となった。一方、実験用地球局においては衛星を広角追尾可能なアンテナ追尾システムや、ドップラシフト追尾・補正システムなどを新規に整備することにより、静止衛星による衛星回線同様の高精度な測定を可能としている。

第3章 衛星軌道上におけるアップリンク干渉量の評価

本章では、空間領域における干渉対策を行う際に必要な、軌道上の電波干渉量とその空間分布の計測法を論じた。干渉量の評価には、干渉による中継器雑音電力の増加量が用いられる。干渉波を送信・停波させて雑音電力を比較する方法は直接的であるが、未知の干渉源や、停波が困難な干渉波には適用できない。これに対して本論文では、衛星搭載アンテナのビームを深宇宙と地球に交互に指向させ、搭載中継器の雑音量を比較する方法を提案している。本方法によって深宇宙指向時の銀河雑音のレベルを基準とした地球指向時の雑音電力上昇量から、地球からの放射雑音量を求めることができる。次に地球からの放射雑音のうち、熱雑音の寄与を理論計算により求めることによって、残りの人工雑音の寄与が評価できる。

次に本方法をデータ中継システムに用いられるSバンド衛星間通信リンクに適応して干渉計測実験を行った。アンテナビームを深宇宙に向ける手段として、衛星のスピンを利用する方法と、フェーズドアレーアンテナによるビーム走査を利用した方法をそれぞれ用いて実験を行った。測定の結果、連続波状の干渉については回線に影響を与える強度のものは見あたらない反面、パルス状の顕著な人工雑音が存在することが明らかとなった。この雑音は波形の特徴から米国のデータ中継衛星において問題となっているレーダ干渉と同様と考えられる。第4章以降においては、このパルス状人工雑音を干渉波の実験対象としている。

第4章 衛星搭載アンテナを用いた電波干渉源の標定

本章では、衛星軌道位置からの干渉放射源の位置推定（標定）システムについて検討した。干渉波の標定システムでは、放射源を推定すべき干渉波の特性自体が衛星軌道位置や使用周波数に依存しており予測し難いこと、重量・電力的制約の厳しい衛星通信ミッションに対して標定専用の搭載機器を付加することが難しいことなどが技術的制約となる。

そこで本論文では、単一衛星上の通信用マルチビームアンテナを使用し、各ビームの受信信号に含まれる干渉波の振幅比較による測角原理を適用した標定システムを提案している。この方法は、2機の衛星を用いて無線測位と同様の原理で標定を行う従来のシステムに比較して、システムの構成が簡単で特殊な機器を新規に用意する必要がなく、また適用できる干渉波の特性に制約が少ないという利点を有している。また、本標定システムを検証するために、衛星搭載マルチビームフェーズドアレーアンテナを使用して実験用標定システムを構成した。位置が既知の地球局に対して標定を行い系統的誤差の除去を行った後、第2章で明らかとなった未知のレーダ波状干渉波に適用して送信源を推定した。次に標定結果に対する各種誤差要因の影響を検討した。搭載アンテナのミスアライメントやアレーの励振誤差によるアンテナパターンの誤差の影響を定量的に評価し、またアレーの軌道上較正によってこれらの誤差による影響が軽減できることを明らかにした。その結果、本標定実験システムではアンテナビーム幅の数分の一程度の標定分解能を実現した。

第5章 衛星搭載アンテナの適応ビーム形成による電波干渉抑圧

本章では、衛星搭載フェーズドアレーアンテナの適応的なビーム形成による干渉波抑圧システムの有効性について検討した。干渉波を自動的に抑圧するアダプティブアンテナは、原理的には電波干渉に対して有効性が高い。しかし、衛星搭載機器特有の制約などにより、従来、衛星上にアダプティブ

アンテナの全ての機能が搭載された例はない。一方、衛星に搭載されたアンテナのビームを地上で制御することにより所望波の利得を維持しつつ干渉波を抑圧するシステムは、軍用通信衛星やデータ中継衛星といった特殊な用途には既に用いられている。しかし上記の例も含めても、アダプティブアンテナの有効性を特徴づけるヌル形成時のアンテナパターンや干渉波の抑圧能力といった性能について実測評価した報告はほとんど見あたらない。

これに対して本章では、干渉波の到来方向に基づいて、地上で適応的なビーム形成計算を行い、その結果に従って衛星上のフェーズドアレーアンテナを制御する干渉抑圧システムを提案した。本システムは、従来より使用されている適応処理とビーム形成を共に地上で行う方式に比較して、受信信号を衛星から地上へ中継する回線における効率が向上でき、また中継用の送信機の非線形性の影響も少ない特徴を有する。

次に、干渉抑圧実験システムを衛星搭載フェーズドアレーアンテナを用いて構成し、性能評価を行った。

実験ではまず、ヌルを形成した状態でアンテナビームの走査パターンを計測することにより、搭載アンテナが所望の方向にヌルを形成できることを確認した。次に、Sバンド衛星間リンクにおいて問題とされている未知のレーダ波状の干渉に対して、第4章において行った干渉源の標定結果に基づいたヌル形成を行い、干渉波の抑圧量を計測した。その結果、最大10 dB以上のほぼ予測通りの干渉抑圧量が得られ、本システムの有効性が明らかになった。

第6章 結論

本章は本論文の内容を要約している。本論文では空間領域の干渉対策を衛星回線に適用する際に不可欠な技術要素である、衛星上における干渉量の評価、干渉波源の推定、干渉波の抑圧について、それぞれ新たな方法を提案した。また、干渉波の具体的事例としてSバンドデータ中継用衛星回線において発生しているパルス状の干渉波を取上げて衛星実機を用いた実験を行い、提案した方法の有効性を明らかにした。

本研究により得られた結果は、上記の事例のみならず、一般的な衛星通信システムにおける電波干渉問題に対しても寄与するものである。アップリンク干渉量の評価法や干渉標定システムは、干渉調整作業においてしばしば問題となる干渉計算根拠値の不確定性の解決や、干渉源の判別に大きく資するものである。また、地上無線通信－衛星通信システム間の国際的干渉基準の策定や、近年必要性が指摘されている衛星軌道からの電波監視システムの構築に際しても寄与するものである。さらに衛星搭載フェーズドアレーによる干渉波抑圧システムは、衛星通信システムにおける軌道位置や周波数の利用効率を飛躍的に向上できる可能性を持った技術と言える。本システムを発展させることにより、電波干渉を能動的に軽減できる機能を持った衛星通信システムも可能となる。本研究はこの様な新しい衛星通信システムの実現に向けても貢献できるものと考ええる。

審査結果の要旨

衛星通信の普及と多様化に伴って、衛星回線への電波干渉が問題となっている。著者は地球上から衛星へのアップリンク干渉を抑圧するために、干渉源の高精度な標定法、および衛星搭載アンテナの適応ビーム形成による干渉抑圧法を提案し、技術試験衛星VI型（ETS-VI）に搭載されたSバンドフェーズドアレーアンテナを用いた実験により、これらの有効性を示した。本論文は、これらの研究成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、地球局およびETS-VIに搭載されたアレーアンテナの構成について述べるとともに、衛星軌道上におけるアレー素子の機械的偏位誤差と各素子の給電位相誤差を測定し、給電位相を修正することによりアンテナ利得の向上と指向誤差の軽減を図っている。

第3章では、干渉量の評価法として、衛星搭載アンテナのビームを地球方向と深宇宙方向に指向させて中継器雑音電力を比較する方法を提案している。この評価法は、地球局からの基準電波の送信が不要であり、アンテナ利得の不確定性を許容できるなどの優れた特徴を有している。また、2.3GHzにおける干渉波を測定し、レーダ波と推定される周期的なパルス状の人工雑音を観測している。

第4章では、マルチビームアンテナの指向性を利用して電力比較することにより、干渉波の波源を標定する手法を提案し、これを第3章で述べた人工雑音波源に適用して、アレーアンテナの給電位相誤差を修正することにより約 0.4° の標定精度が得られることを示している。従来提案されている標定法は特別のアンテナや複数の衛星を用いる必要があるのに対して、この標定法はアンテナ構成が簡単で単一の衛星を用いているにもかかわらず十分な精度が得られるという点で優れている。

第5章では、地上での計算によりアレーアンテナの給電位相を制御し、干渉波到来方向に指向性のヌルを形成することにより、約14dBの干渉波抑圧を達成している。この実験結果は、衛星通信における干渉抑圧法として適応ビーム形成技術が有効であることを実証したもので、重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、衛星軌道上のフェーズドアレーアンテナの性能向上を図るとともに、地球上の干渉源の高精度な標定法、および干渉抑圧法を提案し、実験によりこれらの有効性を示したもので、通信工学およびアンテナ工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。